

## CONSIDERAZIONI GENERALI SULLE STRUTTURE DI CALCESTRUZZO SOGGETTE ALL'INCENDIO

Marco BOZZA \*

\* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

### INTRODUZIONE

#### Il materiale strutturale e l'incendio

L'analisi delle problematiche generali di strutture soggette ad un possibile incendio è di fondamentale importanza per una corretta progettazione strutturale, al fine di garantire un adeguato margine di sicurezza alla resistenza strutturale, tale da consentire l'incolumità delle persone che vi si trovano al loro interno.

Il comportamento delle strutture delle costruzioni, civili e industriali, all'azione di un incendio è innanzi tutto condizionato dal materiale di cui la struttura è costituita. Nel caso specifico, il cemento armato, come materiale composito, ha un comportamento simbiotico: il calcestruzzo protegge, con la sua ridotta conducibilità termica, l'acciaio, che gli fornisce la capacità di resistere a trazione, isolandolo dai gas caldi dell'incendio e ritardandone così la perdita di resistenza. La risposta all'incendio di una struttura di calcestruzzo armato è sostanzialmente positiva, ma la varietà e variabilità dei fenomeni connessi con lo sviluppo dell'incendio e con il comportamento del calcestruzzo soggetto a forti gradienti termici (*shock termico*), rende alquanto complesso il tentativo di determinare quantitativamente la risposta strutturale.

Per dare un inquadramento alla problematica è necessario svolgere un esame più dettagliato dei principali aspetti coinvolti:

- *l'incendio come "azione" sulla struttura;*
- *il comportamento del materiale di cui la struttura è costituita;*
- *il comportamento della struttura nel suo complesso;*
- *il livello di capacità di prestazione richiesto alla struttura.*

#### L'azione incendio

L'incendio agisce sulla struttura in quanto ne riscalda gli elementi, provocando dilatazioni, coazioni, e degrado dei materiali. Essendo la temperatura il parametro principale che governa la risposta dei materiali, l'azione incendio viene pertanto descritta attraverso l'evoluzione nel tempo della temperatura dei gas caldi, prodotti dalla combustione, che entrano in contatto con la struttura, trasmettendole calore per convezione ed irraggiamento. Le modalità di evoluzione di un incendio sono le più varie e dipendono da innumerevoli fattori: in generale può essere individuata una prima fase di innesco con temperature crescenti, ma ancora non molto elevate. Alla fase di innesco segue un'estensione rapida ed incontrollata della combustione, tale da renderla irreversibile e generalizzata. È questa la condizione di *flash over*, oltre la quale inizia la fase di sviluppo pieno dell'incendio, producendo un notevole innalzamento della temperatura fino ad un massimo, quando inizia ad esaurirsi il materiale combustibile. Segue la fase di spegnimento, con una riduzione progressiva e lenta della temperatura.

Trascurando le cause dell'innesco, i parametri che influiscono sullo sviluppo dell'incendio sono principalmente la natura e quantità dei materiali combustibili, le modalità di apporto del comburente (ossigeno), la presenza di provvedimenti atti a circoscrivere spazialmente i fenomeni (compartimentazione) o ad ostacolarne lo sviluppo (impianti di spegnimento automatico).

### DURATA DI RESISTENZA ALL'INCENDIO

Quando in una costruzione si sviluppa un incendio, dal punto di vista della sicurezza la prima preoccupazione è relativa all'incolumità delle persone che si trovano nei locali coinvolti nell'incendio ed in quelli limitrofi, nonché dell'incolumità dei soccorritori. Questi ultimi, anche se adeguatamente protetti dalle fiamme e dai fumi, devono contare sulla capacità di resistenza delle strutture per poter intervenire nei locali investiti dall'incendio. È quindi fondamentale che sotto l'azione di un incendio abbastanza gravoso. Le strutture abbiano una sufficiente capacità di resistenza in termini di "durata", in modo tale da consentire l'intervento delle squadre di soccorso all'interno delle costruzioni con adeguata sicurezza. A tale fine sono state stabilite delle opportune curve temperatura-tempo convenzionali, rappresentative delle condizioni più gravose di incendio, in rapporto alle quali stabilire la capacità di un elemento, strutturale o non strutturale, a fornire l'adeguata risposta in termini di resistenza (R), tenuta (E) ed isolamento (I).

Queste curve, rappresentando azioni sempre crescenti e di durata illimitata, sono concepite per portare comunque alla crisi di una struttura, determinando così una "durata di resistenza" all'incendio intesa come intervallo di tempo che intercorre dallo sviluppo dell'incendio (punto di flash-over) alla crisi della struttura.

La resistenza di una struttura all'incendio viene quindi espressa in termini di "minuti" e le strutture classificate secondo la durata di resistenza in classi R30, R60, R90, R120, R150, R180, R210, R240 minuti a seconda delle esigenze di protezione, del carico di incendio, dei provvedimenti di prevenzione e protezione esistenti.

## LIVELLI DI DANNEGGIAMENTO DELLA STRUTTURA

Nella maggior parte dei casi l'incendio non porta a distruzione la struttura, ma ne provoca soltanto un danneggiamento. Il problema che si pone è quello di valutare il livello di danneggiamento subito dalle strutture per arrivare a stabilire il grado di sicurezza residuo e, nel caso questo sia giudicato insufficiente, prevedere i provvedimenti di rinforzo e ripristino necessari. La tendenza attuale nell'Ingegneria Strutturale, su questo problema, è quella di prevedere per una struttura, non solo la durata di resistenza, come prima definita, ma anche il livello di danneggiamento in caso di incendio reale, allo scopo di garantire un opportuno "livello di protezione" PBD (*Performance Based Design*), in funzione della destinazione di impiego della struttura stessa.

Per le strutture soggette ad incendio si prevedono cinque differenti livelli di protezione:

- *Livello I* nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile;
- *Livello II* requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro e l'intervento delle squadre di soccorso;
- *Livello III* requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare, per tutta la durata dell'incendio, il collasso delle strutture stesse;
- *Livello IV* requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse;
- *Livello V* requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

La capacità portante dovrà essere mantenuta per tutto il tempo necessario a garantire le prestazioni associate a ciascun livello. Il secondo livello corrisponde a quanto già previsto dalle normative attuali con la relativa classe di resistenza REI. I livelli superiori prevedono che la struttura non collassi e subisca danni progressivamente meno importanti.

Per garantire il *Livello IV* si richiede che le costruzioni debbano essere oggetto delle seguenti verifiche:

- *controllo della capacità portante per tutta la durata dell'incendio;*
- *controllo del regime deformativo entro limiti accettabili;*
- *mantenimento di una capacità portante residua che consenta interventi di ripristino.*

Per garantire il *Livello V* si richiede che le costruzioni debbano essere oggetto delle seguenti verifiche:

- *controllo della capacità portante per tutta la durata dell'incendio;*
- *regime deformativo trascurabile;*
- *mantenimento di una capacità portante residua adeguata alla destinazione di progetto.*

## CRITERI DI VERIFICA DELLA SICUREZZA STRUTTURALE

Stabiliti i requisiti prestazionali richiesti, sono necessari i criteri in base ai quali poter stabilire se il grado di sicurezza richiesto è effettivamente conseguito dalla struttura o dall'elemento strutturale in esame. Attualmente la verifica della sicurezza viene affidata solo all'analisi dei singoli elementi strutturali considerati isolati: si ammette implicitamente che la sicurezza all'interno del sistema strutturale sia garantita dalla sicurezza dei singoli componenti. Per conseguire tale scopo la normativa consente l'utilizzo di tre diverse metodologie di progetto: sperimentale, tabellare, analitica.

### Metodologia di progetto sperimentale

Attualmente ammessa sia dalla normativa nazionale, che da quella europea, la metodologia sperimentale si basa sulle seguenti ipotesi:

- *la resistenza al fuoco del sistema strutturale è garantita qualora sia verificata la resistenza al fuoco di tutti gli elementi strutturali presi individualmente;*
- *la resistenza al fuoco dei singoli elementi strutturali è verificata attraverso prove standard in camera d'incendio.*

Sia le dimensioni geometriche che lo stato di tensione applicato devono essere confrontabili con quelli relativi all'impiego finale nell'edificio. A tale fine sono prescritte le dimensioni minime degli elementi di prova ed i carichi applicati durante la prova stessa: in particolare sono prescritti i carichi che generano il raggiungimento dello stato di tensione ammissibile nel punto più sollecitato. La metodologia di progetto sperimentale è completata da un insieme di regole prescrittive, elaborate su base empirica dalla valutazione dei risultati delle prove. I vantaggi di questa procedura sono:

- *avere a disposizione una metodologia di progettazione utilizzata con successo per molti anni;*
- *avere a disposizione una vasta letteratura internazionale per l'interpretazione dei risultati.*

Gli svantaggi sono costituiti da:

- costi alti delle prove sperimentali;
- limiti nelle dimensioni geometriche massime dell'elemento di prova, dettati dalle dimensioni dei forni;
- possibilità di riprodurre leggi di riscaldamento temperatura-tempo monotone crescenti;
- difficoltà nella riproduzione delle effettive condizioni di vincolo dell'elemento strutturale in esame.

### Metodologia di progetto tabellare

La metodologia di progetto "tabellare" è ammessa dalle normative internazionali quando la resistenza al fuoco richiesta, le caratteristiche geometriche della sezione resistente, gli spessori minimi del copriferro ed i quantitativi minimi di armatura degli elementi strutturali in esame rientrano in determinati limiti. Se l'elemento strutturale in esame soddisfa i requisiti sopracitati, allora non sono necessarie ulteriori verifiche della resistenza al fuoco. Il metodo è recepito dalla normativa UNI 9502 e da quella europea tramite l'Eurocodice 2, Parte 1-2.

### Metodologia di progetto analitica

La relazione fondamentale della verifica analitica della sicurezza per le strutture soggette ad incendio è l'espressione:

$$(1) \quad R_{fi,d,t} \geq S_{fi,req,t}$$

(capacità di prestazione di calcolo della sezione  $\geq$  richiesta della prestazione), dove, in generale, i due membri possono essere esplicitati in funzione di:

- resistenza temporale al fuoco:

$$(2) \quad t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

- effetto delle azioni:

$$(3) \quad R_{fi,d,t} \geq E_{fi,req,t}$$

- temperatura:

$$(4) \quad \Theta_{cr,d} \geq \Theta_d$$

con:

$t_{fi,d}$  = valore di progetto della resistenza al fuoco;

$t_{fi,requ}$  = valore richiesto della resistenza al fuoco;

$R_{fi,d,t}$  = valore di progetto della resistenza in caso di incendio;

$E_{fi,req,t}$  = valore di progetto dell'effetto delle azioni nella situazione d'incendio;

$\Theta_{cr,d}$  = valore di progetto della temperatura critica;

$\Theta_d$  = valore di progetto della temperatura del materiale.

### Vantaggi e svantaggi del metodo analitico

I vantaggi della metodologia di progetto analitica sono dati da:

- costi contenuti;
- possibilità di analisi di interi sistemi strutturali;
- possibilità di applicazione di leggi di riscaldamento temperatura-tempo diverse dalla monotonia;
- nessun limite alle dimensioni geometriche degli elementi.

Gli svantaggi sono invece costituiti dall'attuale incapacità di una corretta modellazione matematica dei seguenti fenomeni:

- perdita di tenuta al fumo, ai gas caldi ed alle fiamme;
- danneggiamento localizzato del calcestruzzo ("spalling");
- meccanismi di rottura innescati dalle sollecitazioni taglienti e torcenti;
- collasso per insufficiente capacità rotazionale (duttilità);
- instabilità localizzata delle armature compresse;
- perdita dell'aderenza;
- danneggiamento dei dispositivi di ancoraggio.

Va, però, evidenziato che attualmente potenti codici di calcolo permettono la modellazione strutturale ad elementi finiti con complesse condizioni al contorno, tenendo in considerazione sofisticate leggi di riscaldamento e trasferimento di calore agli elementi strutturali. Ciò consente di eseguire complesse analisi termiche temporali, considerando l'aumento progressivo del danno strutturale per effetto del calore. Tuttavia, tali procedure, oltre a richiedere un alto livello di competenze nell'utilizzo dei codici stessi, risultano poco agevoli in termini di praticità e tempo di esecuzione.

Nonostante questi limiti, i vantaggi della metodologia analitica, rispetto a quella sperimentale, risultano evidenti in termini di rapporto costi/benefici.